ChinaXiv合作期刊

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.170300

崔佩佩, 刘鹏, 刘佳琪, 王劲松, 武爱莲, 董二伟, 丁玉川, 焦晓燕. 不同养分配比对高粱根系生长及养分吸收的影响[J]. 中国生态农业学报, 2017, DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.170300
Cui P P, Liu P, Liu J Q, Wang J S, Wu A L, Dong E W, Ding Y C, Jiao X Y. Effect of different nutrient combinations on root growth and nutrient accumulation in sorghum[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2017, DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.170300

不同养分配比对高粱根系生长及养分吸收的影响*

崔佩佩[1], 刘　鹏[3], 刘佳琪[1], 王劲松[2], 武爱莲[2], 董二伟[2], 丁玉川[2**], 焦晓燕[2]

(1. 山西大学生物工程学院　太原　030006; 2. 山西省农业科学院农业环境与资源研究所　太原　030031; 3. 山西省农业科学院高粱研究所　榆次　030600)

摘　要: 为探明高粱养分吸收和根系生长对氮、磷、钾胁迫的响应, 通过长期定位试验, 在高粱/玉米轮作条件下研究了不同养分配比NPK、PK、NK、NP、CK对高粱根系生长及养分吸收的影响。结果表明: 与NPK相比, 长期不施氮肥(PK)高粱总根长增加18.29%, 总根体积降低26.52%, 且根系主要分布在0~10 cm土层, 直径小于0.5 mm细根所占比例显著增加。不施磷肥(NK)显著抑制了高粱根系生长, 总根长、总根表面积和总根体积分别降低24.03%、27.48%和41.29%。不施钾肥(NP)对细根生长有明显抑制作用。不施氮(PK)、磷(NK)、钾(NP)均降低高粱对相应养分的吸收和累积, 不施氮促进了营养器官中氮和钾素向籽粒转运, 不施磷或钾肥抑制了氮、磷及钾的转运。高粱对养分的吸收、积累和转运与根系形态有关, 不同养分积累与运转与根系形态关系表现不尽相同: 氮素和钾素积累和转运与根系形态具有较好的相关性, 氮素的积累和转运与植株生物量和产量的相关性大于磷素和钾素。综上, 高粱根系形态及养分吸收对氮、磷及钾胁迫响应不同, 该研究可为不同养分瘠薄地高粱高效栽培提供理论依据。

关键词: 高粱; 养分配比; 根系生长; 养分吸收; 养分运转
中图分类号: S514　　**文献标识码:** A

Effect of different nutrient combinations on root growth and nutrient accumulation in sorghum*

CUI Peipei[1], LIU Peng[3], LIU Jiaqi[1], WANG Jinsong[2], WU Ailian[2], DONG Erwei[2], DING Yuchuan[2**], JIAO Xiaoyan[2]

(1. College of Bioengineering, Shanxi University, Taiyuan 030006, China; 2. Institute of Agricultural Environment ＆ Resources, Shanxi Academy of Agricultural Sciences, Taiyuan 030031, China; 3. Institute of Sorghum Research, Shanxi Academy of Agricultural Sciences, Yuci 030600, China)

Abstract: Sorghum, one of the important grains in the world, can grow well in low fertility soils. In order to understand the response of nutrient accumulation and root growth in sorghum to N, P and K stress, a long-term experiment consisting of 5 treatments (NPK, PK, NK, NP and CK) under conditions of sorghum/maize rotation system was initiated in 2011. The individual treatments of the experiment ensured differences in availability of soil N, P and K before sowing sorghum in 2016. The results showed that compared with NPK treatment, PK treatment increased total root length by 18.29% and decreased total root volume by 26.53%. Also under PK treatment, sorghum root distribution was mainly in the 0–10 cm soil layer. The proportion of fine roots with diameter less than 0.5 mm increased significantly under PK treatment. Compared with NPK, total length, total surface area and total root volume of

* 国家现代农业高粱产业技术体系项目(CARS-06-02-03)、山西省农业科学院优势课题组项目(YYS1707)和高粱遗传与种质创新山西省重点实验室项目(2016K-03)资助
**通讯作者: 丁玉川, 主要从事植物营养与施肥及作物高产栽培研究。E-mail: dychuan@163.com
崔佩佩, 研究方向为土地生产力恢复与荒漠化防治。E-mail: 962634926@qq.com
收稿日期: 2017-04-08　接受日期: 2017-06-22
* This work was supported by the China Agriculture Research System (CARS-06-02-03), the Key Research Group Projects of Shanxi Academy of Agricultural Sciences (YYS1707) and the Key Laboratory of Shanxi Province of Heredity Innovation of Sorghum Germplasm Resources (2016K-03).
**Corresponding author, E-mail: dychuan@163.com
Received Apr. 8, 2017; accepted Jun. 22, 2017

chinaXiv:201711.02063v1

sorghum decreased respectively by 24.03%, 27.48% and 41.29% under NK treatment. Without K (i.e. under NP treatment), the growth of fine roots was inhibited. Removal of either N, P or K decreased the accumulation of the corresponding element in sorghum. It was recommended not to induce N or limit N and K translocation from vegetative organs to grains. Both the combinations NK and NP inhibited the transfers of N, P and K to grain from vegetative parts. The accumulation and translation of N, P and K were regulated by root morphology. There were significant relationships between both N and K accumulation and individual root parameter (total root length, total root surface area and total root volume). Compared with P and K accumulation, N accumulation in sorghum had an obviously correlation with both N translocation from vegetative organs to grains and aboveground biomass. In summary, the response of root morphology and nutrient accumulation in sorghum to individual N, P or K stress was different. The results were useful for the cultivation of sorghum in marginal soils.

Keywords: Sorghum; Nutrient combination; Root growth; Nutrient uptake; Nutrient translocation

chinaXiv:201711.02063v1

高粱[*Sorghum bicolor* (L.) Moench]是重要的粮食作物、饲料作物和能源作物，是传统酿造业的原材料。因比其他作物耐旱涝、耐瘠薄和耐盐碱[1-3]，在我国已被作为先锋作物种植在土壤瘠薄、干旱缺水的边际土壤上[4]。然而随着我国酿造业和饲料加工业的快速发展，对高粱需求急剧增加，2016年进口高粱665万t。因此急需研究不同养分胁迫对高粱根系生长和养分吸收的影响以保证瘠薄地高粱的高产高效。

根系是植物吸收水分和养分的主要器官，其生长发育除受遗传因素影响外，还与土壤养分、水分和温度等环境状况密切相关。土壤养分状况对根系生长有显著影响[5]。氮、磷、钾养分不足时，根系的形态和分布产生相应的适应性变化，而根系的变化又影响植物对养分的吸收，进而影响地上部的生长发育及产量[6-7]。前人研究发现：根系对氮、磷、钾养分不足的响应不同，根系通过伸长来适应氮素的不足[8-9]，缺氮时大豆(*Glycine max* L.)的根冠比增加[10]，玉米(*Zea mays* L.)的总根长和总根表面积显著增加[11-12]；缺磷抑制小麦(*Triticum aestivum* L.)根系和拟南芥[*Arabidopsis thaliana* (L.) Heynh]主根的生长，诱导了白扇豆(*Lupinus albus* L.)排根的生长，明显提高了水稻(*Oryza sativa* L.)、拟南芥和平邑甜茶[*Malus hupehensis* (Pamp.) Rehd.]侧根的数量，但极度低磷胁迫下侧根密度会降低[13-18]；缺钾显著抑制根系伸长[19]。同时还发现氮磷钾不足时，小麦叶、茎和籽粒中氮、磷、钾养分积累显著下降，氮、磷养分不足时，籽粒中氮的分配率提高[20]。迄今为止关于高粱根系生长和养分吸收对养分不足响应的研究尚少见报道。因高粱不宜连作，重茬高粱即使在正常的管理措施下也会大幅减产，目前黄土高原地区多采用轮作的方式来克服连作障碍[21]。为探究氮、磷、钾胁迫下高粱生长的适应性变化，同时避免连作障碍对试验的影响，本文在高粱/玉米轮作体系下，研究了长期不同化肥配施下高粱根系生长及养分吸收的变化特征，以期明确高粱根系形态及养分吸收对氮、磷、钾胁迫的适应性变化，为瘠薄地高粱的合理施肥提供依据。

1　材料与方法

1.1　试验设计

试验在山西省晋中市榆次区山西省农业科学院东阳试验基地进行，该基地海拔802 m，年平均气温9.7 ℃，年平均降水量450 mm, 70%以上降水集中在6—9月。试验地土壤类型为潮土，土壤质地为黏壤土，试验始于2011年，土壤耕层基础养分含量为有机质11.24 g·kg^{-1}，全氮1.10 g·kg^{-1}，有效磷(Olsen-P) 7.38 mg·kg^{-1}，速效钾219 mg·kg^{-1}。

试验设NPK、PK、NK、NP、CK 5个处理，其中每年N、P、K用量分别为N 225 kg·hm^{-2}、P_2O_5 75 kg·hm^{-2}、K_2O 75 kg·hm^{-2}。试验所用氮肥为尿素，磷肥为过磷酸钙，钾肥为硫酸钾。磷肥和钾肥作为基肥一次施入；氮肥的1/2作为基肥，剩余1/2的氮肥在拔节期时追施。试验采用随机区组排列，每个小区面积为15 m×5 m=75 m^2，重复3次。2011—2016年分别种植玉米-高粱-玉米-高粱-玉米-高粱，一年1季，每年的施肥和管理都相同。

2016年播种前各处理土壤化学特性见表1，与NPK处理相比，PK处理土壤全氮和硝态氮含量有所降低，NK处理的有效磷含量和NP处理速效钾含量显著降低。2016年5月13日播种高粱‘晋中0592’，9月28日收获，留苗密度为每公顷191 800株，整个生育期为138 d。

表 1　2016 年各施肥处理播种前土壤化学特征

Table 1　The chemical properties of experiment soil under different fertilizer treatments in 2016

处理 Treatment	pH	有机质 Organic matter (g·kg^{-1})	全氮 Total N (g·kg^{-1})	硝态氮 NO_3^--N (mg·kg^{-1})	有效磷 Olsen P (mg·kg^{-1})	速效钾 Available K (mg·kg^{-1})
NPK	8.40±0.04ab	11.93±0.67a	1.01±0.02ab	8.74±1.09bc	7.77±0.38b	233.95±7.50b
PK	8.47±0.01bc	11.21±0.80a	0.94±0.02a	6.25±0.92ab	7.57±0.41b	218.65±8.31ab
NK	8.41±0.02ab	11.65±0.26a	1.05±0.05b	9.38±0.60c	5.90±0.31a	236.61±5.02b

NP	8.36±0.01a	11.29±0.26a	1.10±0.04b	10.71±1.06c	6.37±0.56ab	203.49±7.61a
CK	8.51±0.02c	11.66±0.35a	0.90±0.03a	5.68±0.57a	6.43±0.67ab	210.67±0.00a

同列不同小写字母表示不同处理间差异显著(P<0.05)。Different lowercases in a column indicate significant differences at 0.05 level among different treatments.

1.2 根系采集及测定

在穗花期(8月1日)采集根系。每小区随机选取长势均匀并有代表性的相邻4株，挖取长轴沿行向50 cm、短轴垂直于行向40 cm、深40 cm土体内的全部根系，用根系采集器采集80个10 cm×10 cm×10 cm小土块。用镊子挑选出每个小土块内的全部根系，按编号放入自封袋中，存入–4 ℃冰箱保存待测。测定时用蒸馏水清洗干净并无重叠地置于装有3~4 mm深纯净水的透明树脂塑料盘内使用双面光源扫描根系。采用WinRHIZO Pro(S)v. 2004b软件(Regent Instruments Inc. Canada)分析获得总根长、根直径、总根表面积、总根体积及直径分别为0~0.5 mm、0.5~4 mm和>4 mm根系的根长、根表面积和根体积。然后在105 ℃杀青30 min, 70 ℃下烘干至恒量，测定根系生物量。

1.3 植株采集及养分测定

分别在穗花期(8月1日)和收获期(9月28日)采集植株地上部，每个小区随机选取长势均匀并有代表性的3个植株合成一个样品，植株分叶、茎和籽粒3个部位，在105 ℃杀青30 min，然后70 ℃下烘干至恒量，测定各部位生物量。烘干样品粉碎后进行氮、磷、钾养分测定。植株全氮用浓H_2SO_4消煮，全自动凯氏定氮仪测定；全磷全钾用1∶3浓$HClO_4$和浓HNO_3消煮，全磷用钒钼黄法紫外分光光度计测定，全钾用火焰光度计测定[22]。根据生物量和养分含量计算养分积累量、转移量和转移率:

各部位养分积累量=各部位生物量×各部位养分含量[20] (1)

营养器官养分转移量=穗花期营养器官养分积累量–收获期营养器官养分积累量[23] (2)

营养器官养分转移率=营养器官养分转移量/穗花期营养器官养分积累量×100[23] (3)

1.4 收获时调查项目

收获时各小区单打单收，调查各小区的地上部总生物量、产量及其构成(穗数、穗粒重、千粒重)，并计算收获指数和土壤养分自然供给能力。收获指数是作物经济产量与地上部总生物量的比值。土壤养分自然供给能力指在其他养分充分供应时，不施某一养分，土壤供给的养分使作物产量达到全肥时产量的百分比[24]。

1.5 数据统计分析

采用 Microsoft Excel 2010 对数据进行整理和统计分析；采用 SPSS 20.0 进行单因子方差分析和相关分析，并使用 Duncan 法对不同处理进行多重比较，显著性水平设定为 α=0.05，图表中数据为 3 个重复的平均数±标准误(mean±SE)。

2 结果与分析

2.1 不同养分配比对高粱根系生长的影响

2.1.1 对高粱根系形态和生物量的影响

由表2可知，与NPK处理相比, PK、NK处理显著影响高粱总根长(P<0.05), PK处理的总根长增加18.29%，而NK处理的根系降低24.03%；虽然NP和CK处理的总根长分别有所降低和增加，但未达到显著水平(P>0.05)。PK、NK和CK处理高粱总根体积显著低于NPK和NP处理(P<0.05)；与NPK处理比较，NK、NP和CK处理的根表面积分别降低27.48%、7.90%和2.47%, PK增加3.47%; PK、NK、NP及CK处理对平均根直径没有影响(P>0.05)，但均降低了根系总干重, NK处理的根系生物量显著低于NPK、NP和CK(P<0.05)，其他处理间差异不显著。可见氮素不足显著增加了高粱的根系总长，总根表面积也有增加的趋势，总根体积显著减少；磷素不足对根系的影响最大，根系形态指标及生物量均显著降低；钾素不足也抑制了根系生长，但影响不显著。

表2 不同养分配比对高粱根系形态和总干重的影响

Table 2 Effects of different nutrient combinations on root morphology and biomass of sorghum

处理 Treatment	总根长 Total length ($m\cdot plant^{-1}$)	总根表面积 Total surface area ($cm^2\cdot plant^{-1}$)	总根体积 Total volume ($cm^3\cdot plant^{-1}$)	平均直径 Average diameter (mm)	总根干重 Total dry weight ($g\cdot plant^{-1}$)
NPK	97.76±5.86bc	1 987±18b	73.50±4.23c	0.17±0.01ab	4.14±0.50b
PK	115.64±3.29d	2 056±46b	54.01±2.71b	0.15±0.00a	3.32±0.14ab
NK	74.27±3.86a	1 441±69a	43.15±2.32a	0.16±0.00ab	2.45±0.10a
NP	81.44±2.87ab	1 830±110b	71.23±4.87c	0.18±0.00b	3.71±0.26b
CK	100.56±8.29cd	1 938±114b	55.78±1.97b	0.17±0.01ab	3.53±0.39b

chinaXiv:201711.02063v1

同列不同小写字母表示不同处理间差异显著(P<0.05)。Different lowercases in a column indicate significant differences at 0.05 level among different treatments.

2.1.2　对不同土层高粱根系形态的影响

如表3所示，与NPK、NK和NP处理比较，PK和CK处理显著提高了0~10 cm土层的总根长和根表面积(P<0.05)。就根长而言，PK和CK处理分别有63.61%和63.84%的根系分布在0~10 cm土层，而NPK、NK、NP处理则分别为43.40%、44.89%和45.52%；从根表面积来看，PK和CK处理的60.01%和59.90%分布在0~10 cm土层，NPK、NK、NP分布比例分别为45.52%、46.67%和48.36%；从根体积来看，PK和CK处理的64.56%和64.81%分布在0~10 cm土层，NPK、NK、NP分别为61.62%、63.42%和63.78%，说明不施氮肥导致高粱根系分布较浅，而不施磷或钾肥对根系的分布影响不大。NK和NP处理各层次的根系形态指标都降低，且NK均低于NP处理，为此不施磷或钾肥抑制了各土层根系的生长，且不施磷肥对各土层根系形态的影响都大于钾肥。

表3　不同养分配比对高粱根系分布的影响

Table 3　Effects of different nutrient combination on root distribution of sorghum in different soil layers

根系形态 Root morphology index	处理 Treatment	土层 Soil depth (cm) 0~10	10~20	20~30	30~40
根长	NPK	42.43±1.99a	25.26±1.75b	16.95±0.98c	13.12±1.43c
Root length	PK	73.55±2.26b	18.98±1.75a	12.07±0.97ab	11.03±1.36abc
($m\cdot plant^{-1}$)	NK	33.34±3.15a	20.11±0.87a	11.38±0.23ab	9.44±0.35ab
	NP	37.07±1.57a	20.21±1.00a	12.63±0.62b	11.52±0.93bc
	CK	64.20±5.51b	18.87±2.07a	9.46±1.18a	8.03±0.78a
根表面积	NPK	904.31±40.02b	523.36±33.25c	319.40±12.78c	239.47±16.25b
Root surface area	PK	1 233.70±48.47c	363.49±20.95a	245.60±20.51ab	213.05±28.98ab
($cm^2\cdot plant^{-1}$)	NK	672.65±60.76a	369.08±13.50a	220.08±6.21ab	179.63±9.24ab
	NP	884.83±61.27b	460.48±44.56bc	256.73±19.16b	227.81±25.66ab
	CK	1 160.89±87.21c	409.34±38.53ab	199.18±15.21a	168.79±17.84a
根体积	NPK	45.29±4.33bc	16.77±2.03c	6.81±0.13b	4.63±0.27a
Root volume	PK	34.87±2.85ab	9.54±1.31ab	5.03±0.74a	4.57±0.65a
($cm^3\cdot plant^{-1}$)	NK	27.37±1.98a	7.77±0.59a	4.47±0.25a	3.55±0.26a
	NP	45.43±5.21c	14.46±1.80bc	6.77±0.86ab	4.57±0.67a
	CK	36.15±2.54ab	11.20±0.89ab	4.64±0.26a	3.79±0.48a

同列不同小写字母表示同一根系形态不同处理间差异显著(P<0.05)。Different lowercases in a column indicate significant differences at 0.05 level among different treatments of the same root morphology index.

2.1.3　对高粱不同直径根的影响

将高粱根系按直径(D)划分成细根(0<D≤0.5 mm)、中根(0.5<D≤4 mm)和粗根(D>4 mm)3个等级。由表4可知，与NPK比较，PK和CK显著提高了细根的根长(P<0.05)，而NK和NP显著降低了细根长度(P<0.05)。PK细根的根表面积比NPK显著增加20.97%(P<0.05)；而NK和NP显著降低26.74%和25.63%(P<0.05)。4个缺肥处理细根的根体积与NPK处理间均没有显著性差异。与NPK比较，PK显著提高了中根根长(P<0.05)，而NK显著降低了其根长(P<0.05)，且仅NK处理中根根表面积和根体积显著低于NPK(P<0.05)，NPK、KP、NK及CK间差异均不显著。就粗根而言，与NPK相比，PK、NK、NP和CK对各根系形态的影响一致，PK、NK和CK均显著降低了粗根的根长、根表面积和根体积(P<0.05)，NP处理也有下降的趋势但差异不显著。可见，不施氮肥导致高粱根系的细根增多，粗根减少；不施磷肥高粱的细根、中根和粗根都显著减少；不施钾肥的细根减少，中根和粗根没有显著变化。

表4　不同养分配比对不同直径(D)高粱根系生长参数的影响

Table 4　Effects of different nutrient combinations on root growth parameters of sorghum with different diameters (D)

根系形态 Root morphology index	处理 Treatment	根系直径 Root diameter (mm) 0<D≤0.5	0.5<D≤4	D>4
根长	NPK	58.04±0.24b	38.47±1.43b	1.24±0.15b
Root length	PK	70.96±1.94d	44.14±1.99c	0.54±0.03a
($m\cdot plant^{-1}$)	NK	41.86±1.78a	31.83±0.91a	0.57±0.02a
	NP	41.65±1.60a	38.56±1.27b	1.22±0.04b
	CK	61.94±0.71c	38.24±2.03b	0.38±0.09a
根表面积	NPK	633.48±6.72b	1 140.39±7.07b	212.67±8.72b
Root surface area	PK	766.33±19.38c	1 201.34±26.90b	88.17±7.70a
($cm^2\cdot plant^{-1}$)	NK	464.07±17.70a	882.94±20.86a	94.43±5.62a
	NP	471.09±17.26a	1 161.75±56.83b	197.01±26.98b
	CK	630.61±30.99b	1 211.29±38.38b	96.30±16.82a

chinaXiv:201711.02063v1

根体积 Root volume ($cm^3 \cdot plant^{-1}$)	NPK	5.90±0.49ab	37.53±2.32b	30.07±3.84b
	PK	7.10±0.25b	34.92±1.00b	11.98±1.50a
	NK	4.38±0.37a	25.88±1.06a	12.90±1.00a
	NP	4.91±0.43a	38.85±2.16b	27.47±3.49b
	CK	5.86±0.65ab	36.84±0.42b	13.08±1.15a

同列不同小写字母表示同一根系形态不同处理间差异显著(P<0.05)。Different lowercases in a column indicate significant differences at 0.05 level among different treatments for the same root morphology index.

2.2 不同养分配比对高粱养分吸收和转运的影响

表5表明，与NPK相比, PK和CK显著降低了穗花期营养器官、收获期营养器官及籽粒中氮素积累量(P<0.05); NK和CK显著降低了穗花期营养器官、收获期营养器官及籽粒中磷素积累量(P<0.05); PK、NK、NP和CK显著降低了穗花期营养器官中的钾素积累量, PK、NK和CK显著降低了收获时营养器官中的钾素积累量(P<0.05)，而NP无显著变化; 4个缺肥处理籽粒中钾素积累量均有所降低，仅NK和CK显著降低。可见，不施氮肥抑制了高粱对氮素和钾素的吸收和积累，不施磷肥抑制了对磷素和钾素的吸收和积累，不施钾肥抑制了穗花期钾素的吸收累积。

与NPK比较, PK、NP和CK明显降低了营养器官向籽粒的氮素转移量(P<0.05)，但PK和CK显著增加氮素的转移率; PK、NK和CK明显降低了磷素转移量(P<0.05)，各处理对磷转运率的影响不显著; NP和CK显著降低了钾素转移量(P<0.05), PK的钾素转移率最高(P<0.05), NP钾素转移率最低。可见，不施氮肥导致氮和磷素的转移量降低，而氮和钾素的转移率增加；不施磷肥减少了磷素的转移量；不施钾肥抑制了氮和钾的转运。

表5 不同养分配比对高粱氮、磷及钾吸收和转运的影响

Table 5 Effects of different nutrient combination on N, P and K uptake and translocation of sorghum

养分 Nutrient	处理 Treatment	营养器官养分积累量 Nutrient accumulation in vegetative organs ($kg \cdot hm^{-2}$)		收获期籽粒养分积累量 Nutrient accumulation in grain ($kg \cdot hm^{-2}$)	养分转移 Nutrient translocation	
		穗花期 Florescence stage	收获期 Harvest stage		转移量 Translocation capacity ($kg \cdot hm^{-2}$)	转移率 Translocation rate (%)
N	NPK	134.43±2.45b	43.79±3.37b	122.29±1.91c	90.63±1.07b	67.49±1.96ab
	PK	91.05±4.01a	18.56±0.76a	84.99±2.06b	72.50±4.21a	79.53±1.27c
	NK	125.70±3.05b	35.37±1.52b	114.99±4.44c	90.33±4.33b	71.78±1.80b
	NP	120.43±5.35b	44.21±5.28b	111.26±12.35c	76.22±2.24a	63.49±2.86a
	CK	86.19±3.20a	16.70±0.46a	60.84±9.93a	69.49±3.24a	80.58±0.89c
P	NPK	13.59±0.36b	3.22±0.55c	24.76±1.06b	10.37±0.91b	76.04±4.65a
	PK	11.92±0.19ab	3.14±0.15c	26.21±1.55b	8.78±0.34a	73.62±1.67a
	NK	11.35±0.46a	2.51±0.31a	17.46±0.85a	8.84±0.42a	77.93±2.46a
	NP	13.57±0.97b	2.97±0.24bc	24.00±3.17b	10.60±0.86b	77.99±1.46a
	CK	10.09±0.65a	2.80±0.16b	19.69±3.80a	7.29±0.51a	72.16±0.80a
K	NPK	162.13±10.04c	95.69±2.58c	33.26±0.63b	66.44±7.87c	40.69±2.40b
	PK	133.62±5.74b	63.56±2.43a	32.67±1.03b	70.06±7.53c	52.16±3.53c
	NK	146.96±10.70b	80.80±0.30b	25.69±1.54a	66.16±0.75c	45.02±0.37bc
	NP	116.03±7.97a	95.24±1.80c	31.63±3.38b	20.80±2.65a	17.87±2.01a
	CK	109.06±4.86a	61.54±3.85a	23.32±3.74a	47.53±5.30b	43.45±3.60bc

同列不同小写字母表示同一养分不同处理间差异显著(P<0.05)。Different lowercases in a column indicate significant differences at 0.05 level among different treatments for the same nutrient.

2.3 不同养分配比对高粱产量及其构成因素的影响

由表6可知，与NPK相比, PK和CK的产量显著降低(P<0.05), NK和NP的产量降低但差异不显著(P>0.05), PK、NK、NP和CK的减产幅度分别为: 35.76%、3.79%、6.56%和36.74%；地上部生物量的变化与产量一致, PK、NK、NP及CK处理降幅分别为: 24.55%、4.40%、0.56%和23.53%。就产量构成因素而言，施肥处理对单位面积穗数没有显著影响，但显著降低了单穗粒重(P<0.05)，分别降低37.26%、8.92%、8.54%和42.15%; PK和CK的千粒重显著高于NPK (P<0.05), NK和NP没有显著影响。PK和CK的收获指数显著低于NPK(P<0.05)，而NK、NP和NPK处理间无显著差异。根据产量结果计算可知，连续6年不同养分配比土壤氮、磷和钾的养分供给能力分别为64.24%、96.21%和93.44%。可见，在该区域氮肥是影响高粱产量及其构成的首要限制因子，磷肥和钾肥的影响次之。

chinaXiv:201711.02063v1

ChinaXiv合作期刊

表 6　不同养分配比对高粱产量及其构成因素的影响

Table 6　Effects of different nutrient combination on yield and its components of sorghum

处理 Treatment	产量 Yield (kg·hm^{-2})	地上部生物量 Aboveground biomass (kg·hm^{-2})	穗数 Spike number (10^4·hm^{-2})	穗粒重 Grain weight per spike (g)	千粒重 1000-grain weight g)	收获指数 Harvest index
NPK	9 606±252b	16 062±483b	18.41±0.81a	52.34±2.27c	22.33±0.57a	0.60±0.01b
PK	6 171±293a	12 120±1291a	18.85±1.15a	32.84±1.21a	25.37±0.52b	0.52±0.03a
NK	9 242±295b	15 356±889b	19.39±0.24a	47.67±1.45b	22.29±0.64a	0.60±0.03b
NP	8 976±245b	15 972±624b	18.77±0.75a	47.87±0.77b	21.77±0.47a	0.56±0.01ab
CK	6 077±250a	12 283±987a	20.05±0.50a	30.28±0.56a	24.56±0.33b	0.50±0.03a

同列不同小写字母表示不同处理间差异显著(P<0.05)。Different lowercases in a column indicate significant differences at 0.05 level among different treatments.

2.4　高粱养分吸收、累积和转运与根系形态和产量的相关关系

由表7可知: 总根长与两个时期营养器官的氮积累量均呈显著负相关, 总根表面积与氮素转移量显著负相关, 总根体积与收获期营养器官氮积累量显著正相关, 与氮素转移率显著负相关; 仅总根表面积与收获期籽粒磷量显著正相关; 总根体积与收获期营养器官钾积累量显著正相关, 与钾素转移率显著负相关, 根系平均直径与钾素转移量和转移率极显著负相关。说明作物对养分的吸收、积累和转运受根系形态的影响, 磷素的积累和转运与根系形态的相关性弱于氮素和钾素。

穗花期营养器官、收获期营养器官和籽粒中氮积累量、氮素转移量都与产量极显著正相关; 整株生物量除与氮转运量显著正相关, 与不同时期氮积累量都极显著正相关; 氮素转移率与产量、整株生物量极显著负相关。穗花期营养器官磷积累量与产量、整株生物量呈显著正相关, 磷素转移量与产量显著正相关。穗花期营养器官钾积累量与产量显著正相关, 收获期营养器官钾积累量与产量、整株生物量极显著正相关。说明养分的吸收、积累和转运与作物最终产量有密切关系, 氮素的积累和转运与产量和植株生物量的相关性远大于磷素和钾素。

表 7　高粱氮磷钾养分吸收与根系形态和产量的相关系数

Table 7　Correlation coefficients of N, P, K uptake and root morphology indexes and grain yield

养分 Nutrient	养分吸收指标 Nutrient uptake index	总根长 Total root length	总根表面积 Total root surface area	总根体积 Total root volume	平均直径 Average diameter	产量 Grain yield	整株生物量 Whole plant biomass
N	穗花期营养器官积累量 Accumulation amount in vegetative organs during flowering stage	−0.611*	−0.474	0.242	0.173	0.937**	0.785**
	收获期营养器官积累量 Accumulation amount in vegetative organs at harvest stage	−0.570*	−0.285	0.534*	0.344	0.892**	0.832**
	收获期籽粒含量量 Grain nitrogen content at harvest stage	−0.385	−0.232	0.309	0.074	0.851**	0.732**
	转移量 Transfer capacity	−0.479	−0.540*	−0.140	−0.060	0.744**	0.518*
	转移率 Transfer rate	0.503	0.166	−0.621*	−0.400	−0.814**	−0.800**
P	穗花期营养器官积累量 Accumulation amount in vegetative organs at flowering stage	−0.077	0.042	0.410	0.229	0.556*	0.554*
	收获期营养器官积累量 Accumulation amount in vegetative organs at harvest stage	0.289	0.431	0.497	−0.274	0.035	0.250
	收获期籽粒含量量 Grain nitrogen content at harvest stage	0.490	0.629*	0.491	−0.111	−0.049	0.059
	转移量 Transfer capacity	−0.173	−0.098	0.257	0.324	0.569*	0.493
	转移率 Transfer rate	−0.342	−0.386	−0.167	0.354	0.403	0.188
K	穗花期营养器官积累量 Accumulation amount in vegetative organs at flowering stage	−0.199	−0.265	0.017	−0.358	0.597*	0.416
	收获期营养器官积累量 Accumulation amount in vegetative organs at harvest stage	−0.486	−0.172	0.610*	0.424	0.869**	0.809**

chinaXiv:201711.02063v1

收获期籽粒含量量 Grain nitrogen content at harvest stage	0.287	0.424	0.474	−0.101	0.245	0.248
转移量 Transfer capacity	0.178	−0.129	−0.454	−0.680**	−0.021	−0.167
转移率 Transfer rate	0.361	−0.004	−0.582*	−0.658**	−0.395	−0.464

和*分别表示极显著(P<0.01)和显著(P<0.05)相关。 and * indicate significant correlations at 0.01 and 0.05 levels, respectively.

3 讨论与结论

3.1 不同养分配比对高粱根系生长的影响

作物通过根系吸收所需的各种养分，根系总长和总表面积反映了根系的被动吸收能力[25]。氮磷钾养分的不足均不同程度地抑制了高粱根系的生长，但根系形态对不同养分亏缺的适应性不同。有关氮肥对大豆[10]、玉米[11-12,26]、小麦[27]、平邑甜茶[28]、菘蓝(*Isatis indigotica* Fortune)[29]的研究证明缺氮促使根系伸长，根冠比增大，根系活力降低。本试验也表明，高粱通过增加根系总长和总表面积来扩大根系与氮素的接触面积，提高被动吸收能力来适应主动吸收能力下降的逆境，最终促进根系对氮素的高效吸收，而总根体积和总干重的减少说明吸收的氮素仍不能满足正常生长。有研究认为磷胁迫诱导根系重塑，缺磷促进了油菜(*Brassica campestris* L. var. amplexicaulis Makino)[30]、马铃薯(*Solanum tuberosum* L.)[30]和大豆[31]根系的生长，大麦(*Hordeum vulgare* L.)[30,32]和甘薯[*Dioscorea esculenta* (Lour.) Burkill][33]的根长和根表面积却显著减少；也有研究认为施钾或缺钾均可对作物产生抑制作用，施钾使棉花根系的总长、总表面积和总体积显著降低，缺钾对小麦、水稻和西瓜[*Citrullus lanatus* (Thunb.) Matsum. et Nakai]根系生长有一定的抑制作用[34-35]。本研究中磷素不足使高粱根系总长、总表面积和总体积显著降低，导致根系整体吸收能力下降，最终抑制根系的生长。钾素不足也抑制了根系的生长，但影响不显著。

深层根系能增强根系对养分的吸收利用，其根量对产量提高有显著作用[36]。本试验根系分层参数研究表明，不施氮肥导致高粱的根系主要分布在0~10 cm的浅层。不施磷或钾肥对根系分布的影响不大，但抑制了各土层根系的生长，且不施磷肥的影响大于钾肥。不同直径根系的作用不同，细根主要控制水分和养分的吸收，而粗根主控根系下扎和健壮程度[37-38]。谢孟林等[26]认为低氮胁迫下，玉米细根(0~0.2 mm)比例增加。本文根系分级参数研究表明，不施氮肥导致直径≤0.5 mm的细根增多，直径>4 mm粗根减少；不施磷肥高粱的细根、中根和粗根都显著减少；不施钾肥导致高粱细根减少，中根和粗根没有显著变化。可见，氮素不足时，高粱会产生更多的细根来提高其对养分的吸收能力，但同时根系分布较浅，不利于吸收利用深层的养分。磷素不足，不同土层不同直径的根系生长都受到抑制。钾素不足对高粱根系生长的影响小于氮、磷的不足，但细根减少也会影响养分的吸收。

前人的研究[39]认为根系形态对营养亏缺的适应性变化是一个受基因调控的生理过程，可能与碳水化合物的重新分配和生长素、细胞分裂素、乙烯等内源激素的调节有关。玫瑰(*Rosa rugosa* Thunb.)幼苗缺N或缺P时，地上部干物质向根部转运，促进根系长度和数量明显增加，根系表面积增大。本试验中高粱根系感受到氮素不足时，诱导地上部的同化物质向根系转运，从而刺激新根的产生，促进根系的伸长和根表面积的增加。磷素不足抑制了根系生长，与前人研究结果不一致，可能是因为高粱是喜磷禾本科作物，尤其在密植条件下对磷的需求更为强烈[40]。钾素对根系生长的作用机制不同于氮素和磷素[41]，钾素直接参与植物光合作用且是蛋白质、碳水化合物和呼吸代谢中多种酶的活化剂，钾素不足影响了光合作用及其产物的运转，降低了同化产物的合成与积累，最终导致细根生长受到抑制。

3.2 不同养分配比对高粱养分吸收和转运的影响

根系形态及其分布影响植株对养分的吸收、累积和转运[42]。杨苞梅等[43]认为，在蕉园土上不施氮肥显著降低了高粱对氮素的吸收，但提高了对磷和钾的吸收；不施磷肥降低了对磷的吸收，却提高了对钾的吸收。而本试验中，不施氮肥抑制了高粱对氮、钾的吸收和积累，不施磷肥抑制了磷素和钾素的吸收累积，不施钾肥抑制了穗花期钾素的吸收累积。分析发现不施氮、磷、钾肥中的任一种都会抑制高粱对相应养分的吸收和累积，而不施氮、磷肥对钾素吸收的影响表现出不一致的结论可能与供试土壤及高粱品种不同有关，需要进一步的研究。本试验证明，氮素不足时，营养器官中氮和钾素的转移率增加，这是为了保证新形成的生长中心正常生长，但过多的转运会导致叶片光合下降，加速叶片衰老，最终降低产量[44]。不施磷肥减少了磷素的转移量，不施钾肥抑制了氮和钾的转运，说明磷、钾不足直接影响了养分转运，不利于籽粒中养分的累积。

3.3 不同养分配比对高粱产量及其构成因素的影响

已有研究表明，氮素是影响甜高粱和饲草高粱产量的首要养分因素[45-46]。本次试验结果也显示，氮肥是影响粒用高粱生物产量、籽粒产量及其构成因素的首要限制因子，磷肥和钾肥的影响次之。试验中不施氮肥导致高粱的地上部生物量、产量、穗粒重及收获指数均显著降低，但千粒重增加，千粒重增加的原因

chinaXiv:201711.02063v1

ChinaXiv合作期刊

是穗粒重的显著降低在一定程度上削弱了籽粒间的竞争。Ciampitti等[47]也认为，籽粒大小对高粱产量的贡献很小，穗数和穗粒重才是影响高粱产量的决定因素。

土壤养分自然供给能力是评价土壤肥力的重要指标。门明新等[24]发现连续2年定位施肥后，土壤养分供给能力会下降到稳定水平。本试验中，连续6年定位试验后，土壤氮、磷和钾的养分供给能力分别为64.24%、96.21%和93.44%。可见氮素补充对高粱生产的意义远大于磷、钾。且相关分析发现磷素积累、转运与根系形态的相关性弱于氮素和钾素，氮素积累、转运与产量和植株生物量的相关性远大于磷素和钾素。所以，虽然不施磷肥显著抑制了根系生长，但不施氮肥的减产幅度显著大于不施磷肥。

3.4　结论

氮素不足时，高粱通过增加总根长、根表面积及细根比例来吸收更多氮素，但根系分布较浅及根体积的减少抑制了其对氮素和钾素的吸收和积累，即便养分转移率增加，而转移量降低最终导致减产；低磷胁迫显著抑制了根系的生长、磷钾的吸收累积及磷素的转移量；低钾胁迫显著抑制了细根的生长、钾素的吸收累积及氮钾的转运。虽然高粱根系生长及养分吸收对氮、磷、钾胁迫的适应性变化不同，但最终都会导致减产，可见，在黄土高原种植高粱，氮、磷、钾肥的施用都必不可少。

参考文献

[1] Farré I, Faci J M. Comparative response of maize (*Zea mays* L.) and sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench) to deficit irrigation in a Mediterranean environment[J]. Agricultural Water Management, 2006, 83(1/2): 135–143

[2] 王鑫，李志强，谷卫彬，等. 盐胁迫下高粱新生叶片结构和光合特性的系统调控[J]. 作物学报, 2010, 36(11): 1941–1949
Wang X, Li Z Q, Gu W B, et al. Systemic regulation of anatomic structure and photosynthetic characteristics of developing leaves in sorghum seedlings under salt stress[J]. Acta Agronomica Sinica, 2010, 36(11): 1941–1949

[3] Moore W J, Ditmore M, TeBeest D O. The effects of cropping history on grain sorghum yields and anthracnose severity in Arkansas[J]. Crop Protection, 2009, 28(9): 737–743

[4] 王劲松，焦晓燕，丁玉川，等. 粒用高粱养分吸收、产量及品质对氮磷钾营养的响应[J]. 作物学报, 2015, 41(8): 1269–1278
Wang J S, Jiao X Y, Ding Y C, et al. Response of nutrient uptake, yield and quality of grain sorghum to nutrition of nitrogen, phosphorus and potassium[J]. Acta Agronomica Sinica, 2015, 41(8): 1269–1278

[5] Marschner H, Kirkby E, Cakmak L. Effect of mineral nutritional status on shoot-root partitioning of photoassimilates and cycling of mineral nutrients[J]. Journal of Experimental Botany, 1996, 47(S1): 1255–1263

[6] Bonser A M, Lynch J P, Snapp S. Effect of phosphorus deficiency on growth angle of basal roots in *Phaseolus vulgaris*[J]. New Phytologist, 1996, 132(2): 281–288

[7] 马献发，宋凤斌，张继舟. 根系对土壤环境胁迫响应的研究进展[J]. 中国农学通报, 2011, 27(5): 44–48
Ma X F, Song F B, Zhang J Z. Advances of research of roots responses to environmental stress on soil[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2011, 27(5): 44–48

[8] Ericsson T. Growth and shoot: Root ratio of seedlings in relation to nutrient availability[J]. Plant and Soil, 1995, 168–169(1): 205–214

[9] Bonifas K D, Lindquist J L. Effects of nitrogen supply on the root morphology of corn and velvetleaf[J]. Journal of Plant Nutrition, 2009, 32(8): 1371–1382

[10] 王树起，韩晓增，乔云发，等. 施氮对大豆根系形态和氮素吸收积累的影响[J]. 中国生态农业学报, 2009, 17(6): 1069–1073
Wang S Q, Han X Z, Qiao Y F, et al. Root morphology and nitrogen accumulation in soybean (*Glycine max* L.) under different nitrogen application levels[J]. Chinese Journal of Eco-agriculture, 2009, 17(6): 1069–1073

[11] 姜琳琳，韩立思，韩晓日，等. 氮素对玉米幼苗生长、根系形态及氮素吸收利用效率的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(1): 247–253
Jiang L L, Han L S, Han X R, et al. Effects of nitrogen on growth, root morphological traits, nitrogen uptake and utilization efficiency of maize seedlings[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2011, 17(1): 247–253

[12] 武永军，沈玉芳，颜秦峰，等. 缺氮复氮处理对玉米根系生长、根系活力、硝态氮及氨基酸含量的影响[J]. 西北农业学报, 2012, 21(12): 61–64
Wu Y J, Shen Y F, Yan Q F, et al. Effect of N deficiency and N recovery treatment on root growth, root activity, content of NO_3-N and amino acids[J]. Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica, 2012, 21(12): 61–64

[13] 陈磊，王盛锋，刘荣乐，等. 不同磷供应水平下小麦根系形态及根际过程的变化特征[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(2): 324–331
Chen L, Wang S F, Liu R L, et al. Changes of root morphology and rhizosphere processes of wheat under different phosphate

chinaXiv:201711.02063v1

ChinaXiv合作期刊

supply[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2012, 18(2): 324–331
[14] Sánchez-Calderón L, López-Bucio J, Chacón-López A, et al. Phosphate starvation induces a determinate developmental program in the roots of *Arabidopsis thaliana*[J]. Plant and Cell Physiology, 2005, 46(1): 174–184
[15] Neumann G, Martinoia E. Cluster roots — n underground adaptation for survival in extreme environments[J]. Trends in Plant Science, 2002, 7(4): 162–167
[16] 李海波, 夏铭, 吴平, 等. 低磷胁迫对水稻苗期侧根生长及养分吸收的影响[J]. 植物学报, 2001, 43(11): 1154–1160
Li H B, Xia M, Wu P, et al. Effect of phosphorus deficiency stress on rice lateral root growth and nutrient absorption[J]. Acta Botanica Sinica, 2001, 43(11): 1154–1160
[17] 范伟国, 杨洪强, 韩小娇. 低磷胁迫下平邑甜茶根构型与磷吸收特性的变化[J]. 园艺学报, 2007, 34(6): 1341–1346
Fan W G, Yang H Q, Han X J. Changes of root architecture and phosphorus uptake by roots of *Malus hupehensis* (Pamp) Rehd. under the condition of phosphorus-deficiency[J]. Acta Horticulturae Sinica, 2007, 34(6): 1341–1346
[18] 万惠燕, 刘嘉杰, 王金祥, 等. 磷空间有效性对拟南芥根形态构型的影响[J]. 植物生理学通讯, 2007, 43(3): 425–429
Wan H Y, Liu J J, Wang J X, et al. Effects of phosphorus spatial availability on root morphology and architecture in *Arabidopsis thaliana* (L.) Heynh[J]. Plant Physiology Communications, 2007, 43(3): 425–429
[19] 张志勇, 王清连, 李召虎, 等. 缺钾对棉花幼苗根系生长的影响及其生理机制[J]. 作物学报, 2009, 35(4): 718–723
Zhang Z Y, Wang Q L, Li Z H, et al. Effect of potassium deficiency on root growth of cotton (*Gossypium hirsutum* L.) seedlings and its physiological mechanisms involved[J]. Acta Agronomica Sinica, 2009, 35(4): 718–723
[20] 杨玉敏, 张庆玉, 李俊, 等. 川农16和川麦42在氮磷钾胁迫下养分积累、分配和利用[J]. 西南农业学报, 2015, 28(4): 1675–1682
Yang Y M, Zhang Q Y, Li J, et al. Effect of nutrient accumulation, distribution and use efficiency of Chuannong 16 and Chuanmai 42 under N, P and K stress[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2015, 28(4): 1675–1682
[21] 樊芳芳, 王劲松, 董二伟, 等. 连作对高粱生长及根区土壤环境的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2016, 21(3): 127–133
Fan F F, Wang J S, Dong E W, et al. Effects of sorghum continuous cropping on the growth of sorghum and soil environment[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2016, 21(3): 127–133
[22] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 第3版. 北京: 中国农业出版社, 2000: 30–177
Bao S D. Soil and Agricultural Chemistry Analysis[M]. 3rd ed. Beijing: Agricultural Press China, 2000: 30–177
[23] 杨恒山, 张玉芹, 徐寿军, 等. 超高产春玉米干物质及养分积累与转运特征[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(2): 315–323
Yang H S, Zhang Y Q, Xu S J, et al. Characteristics of dry matter and nutrient accumulation and translocation of super-high-yield spring maize[J]. Plant nutrition and Fertilizer Science, 2012, 18(2): 315–323
[24] 门明新, 李新旺, 许皞. 长期施肥对华北平原潮土作物产量及稳定性的影响[J]. 中国农业科学, 2008, 41(8): 2339–2346
Men M X, Li X W, Xu H. Effects of long-term fertilization on crop yields and stability[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2008, 41(8): 2339–2346
[25] 曹秀, 夏仁学, 杨环宇, 等. 沙培条件下磷、钾、钙亏缺对枳(*Poncirus trifoliata*)幼苗根系形态及营养吸收的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(4): 981–988
Cao X, Xia R X, Yang H Y, et al. Effects of P, K and Ca deficiency on the root morphology and nutrient absorption of *Poncirus trifoliata* seedlings[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2014, 20(4): 981–988
[26] 谢孟林, 李强, 查丽, 等. 低氮胁迫对不同耐低氮性玉米品种幼苗根系形态和生理特征的影响[J]. 中国生态农业学报, 2015, 23(8): 946–953
Xie M L, Li Q, Zha L, et al. Effects of low nitrogen stress on the physiological and morphological traits of roots of different low nitrogen tolerance maize varieties at seedling stage[J]. Chinese Journal of Eco-agriculture, 2015, 23(8): 946–953
[27] 张向前, 曹承富, 陈欢, 等. 长期定位施肥对砂姜黑土小麦根系性状和根冠比的影响[J]. 麦类作物学报, 2017, 37(3): 382–389
Zhang X Q, Cao C F, Chen H, et al. Effect of long-term fertilization on root traits and root-shoot ratio of wheat in lime concretion black soil[J]. Journal of Triticeae Crops, 2017, 37(3): 382–389
[28] 乔海涛, 杨洪强, 申为宝, 等. 缺氮和缺铁对平邑甜茶幼苗根系构型的影响[J]. 园艺学报, 2009, 36(3): 321–326
Qiao H T, Yang H Q, Shen W B, et al. Effect of nitrogen-deficient and iron-deficient on root architecture of young seedlings of *Malus hupehensis* (Pamp) Rehd[J]. Acta Horticulturae Sinica, 2009, 36(3): 321–326
[29] 施晟璐, 叶冰竹, 张润枝, 等. 缺氮和复氮对菘蓝幼苗生长及氮代谢的影响[J]. 西北植物学报, 2015, 35(3): 523–529
Shi S L, Ye B Z, Zhang R Z, et al. Effect of N deficiency and N recovery on growth and nitrogen metabolism of *Isatis indigotica* seedlings[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2015, 35(3): 523–529
[30] Sato A, Miura K. Root architecture remodeling induced by phosphate starvation[J]. Plant Signaling & Behavior, 2011, 6(8):

chinaXiv:201711.02063v1

ChinaXiv合作期刊

1122–1126
[31] 王树起, 韩晓增, 严君, 等. 缺磷胁迫对大豆根系形态和氮磷吸收积累的影响[J]. 土壤通报, 2010, 41(3): 644–649
Wang S Q, Han X Z, Yan J, et al. Impact of phosphorus deficiency stress on root morphology, nitrogen concentration and phosphorus accumulation of soybean (*Glycine max* L.)[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2010, 41(3): 644–649
[32] Wang Y L, Almvik M, Clarke N, et al. Contrasting responses of root morphology and root-exuded organic acids to low phosphorus availability in three important food crops with divergent root traits[J]. AoB Plants, 2015, 7: 1–11
[33] 宁运旺, 马洪波, 张辉, 等. 氮、磷、钾对甘薯生长前期根系形态和植株内源激素含量的影响[J]. 江苏农业学报, 2013, 29(6): 1326–1332
Ning Y W, Ma H B, Zhang H, et al. Effects of nitrogen, phosphorus and potassium on root morphology and endogenous hormone contents of sweet potato at early growing stages[J]. Jiangsu Journal of Agricultural Sciences, 2013, 29(6): 1326–1332
[34] 潘艳花, 马忠明, 吕晓东, 等. 不同供钾水平对西瓜幼苗生长和根系形态的影响[J]. 中国生态农业学报, 2012, 20(5): 536–541
Pan Y H, Ma Z M, Lü X D, et al. Effects of different potassium nutrition on growth and root morphological traits of watermelon seedling[J]. Chinese Journal of Eco-agriculture, 2012, 20(5): 536–541
[35] 张永清, 毕润成, 庞春花, 等. 不同品种春小麦根系对低钾胁迫的生物学响应[J]. 西北植物学报, 2006, 26(6): 1190–1194
Zhang Y Q, Bi R C, Pang C H, et al. Biological responses of the roots of different spring wheat varieties to low-potassium stress[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2006, 26(6): 1190–1194
[36] 刘梅, 吴广俊, 路笃旭, 等. 不同年代玉米品种氮素利用效率与其根系特征的关系[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(1): 71–82
Liu M, Wu G J, Lu D X, et al. Improvement of nitrogen use efficiency and the relationship with root system characters of maize cultivars in different years[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2017, 23(1): 71–82
[37] Sullivan W M, Jiang Z C, Hull R J. Root morphology and its relationship with nitrate uptake in Kentucky bluegrass[J]. Crop Science, 2000, 40(3): 765–772
[38] 陈哲, 伊霞, 陈范骏, 等. 玉米根系对局部氮磷供应响应的基因型差异[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(1): 83–90
Chen Z, Yi X, Chen F J, et al. Differential response of maize roots to heterogeneous local nitrogen and phosphorus supply and genotypic differences[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2017, 23(1): 83–90
[39] 孙曰波, 赵从凯, 张玲, 等. 氮磷钾营养亏缺对玫瑰幼苗根构型的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2013, (3): 43–48
Sun Y B, Zhao C K, Zhang L, et al. Effect of N, P, K-deficiency on root architecture of young seedlings of *Rosa rugosa*[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2013, (3): 43–48
[40] 辽宁省农业科学院. 中国高粱栽培学[M]. 北京: 农业出版社, 1988: 243–244
Liaoning Academy of Agricultural Sciences. Chinese Sorghum Cultivation[M]. Beijing: Agricultural Press, 1988: 243–244
[41] 陈波浪, 盛建东, 蒋平安, 等. 钾营养对水培棉花生长发育的影响[J]. 中国农学通报, 2008, 24(11): 267–271
Chen B L, Sheng J D, Jiang P A, et al. Effects of potassium nutrition on growth of cotton on liquid foster[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2008, 24(11): 267–271
[42] Saengwilai P, Tian X, Lynch J P. Low crown root number enhances nitrogen acquisition from low-nitrogen soils in maize[J]. Plant Physiology, 2014, 166(2): 581–589
[43] 杨苞梅, 姚丽贤, 李国良, 等. 不同养分组合对高粱吸收氮磷钾养分的影响[J]. 土壤肥料科学, 2008, 24(4): 282–290
Yang B M, Yao L X, Li G L, et al. Effect of nutrient combination on uptake of nitrogen phosphorus and potassium of sorghum[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2008, 24(4): 282–290
[44] 徐克章. 水稻开花后叶片含氮量与光合作用的动态变化及其关系[J]. 作物学报, 1995, 21(2): 171–175
Xu K Z. The dynamic changes of nitrogen content and photosynthesis and their correlations in pot rice leaves after anthesis[J]. Acta Agronomica Sinica, 1995, 21(2): 171–175
[45] 王志春, 王永慧, 陈建平, 等. 氮磷钾肥配施对盐碱地甜高粱产量及干物质积累的影响[J]. 江苏农业科学, 2013, 41(11): 80–81
Wang Z C, Wang Y H, Chen J P, et al. Effects of combined application of nitrogen, phosphorus and potassium on yield and dry matter accumulation of sweet sorghum in saline alkali soil[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2013, 41(11): 80–81
[46] 周怀平, 郝保平, 关春林, 等. 施肥对饲草高粱生长及营养品质的影响[J]. 中国生态农业学报, 2009, 17(1): 60–63
Zhou H P, Hao B P, Guan C L, et al. Effect of fertilizer application on nutritive quality and growth of hybrid sorghum grass[J]. Chinese Journal of Eco-agriculture, 2009, 17(1): 60–63
[47] Ciampitti I A, Vara Prasad P V. Historical synthesis-analysis of changes in grain nitrogen dynamics in sorghum[J]. Frontiers in Plant Science, 2016, 7: 275

chinaXiv:201711.02063v1